



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 199 56 739 B4** 2010.02.18

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **199 56 739.5**  
(22) Anmeldetag: **25.11.1999**  
(43) Offenlegungstag: **06.07.2000**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **18.02.2010**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H01S 3/098** (2006.01)  
**H01S 3/11** (2006.01)  
**H01S 3/067** (2006.01)  
**H01S 3/109** (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:  
**199728 25.11.1998 US**

(73) Patentinhaber:  
**IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich., US**

(74) Vertreter:  
**Patent- und Rechtsanwälte Bardehle, Pagenberg,  
Dost, Altenburg, Geissler, 81679 München**

(72) Erfinder:  
**Fermann, Martin E., Dr., Ann Arbor, Mich., US**

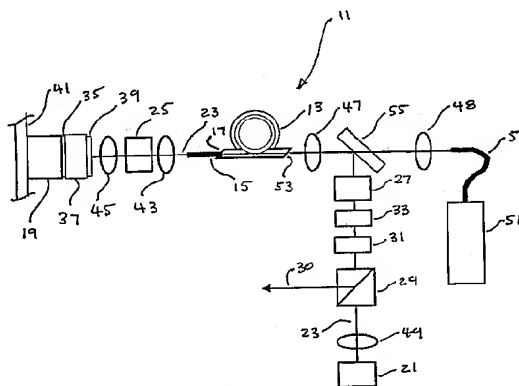
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

US	56 27 848	A
US	54 50 427	A
US	56 89 519	A
EP	07 04 944	A1

**US-Z: Opt. Lett., Vol. 21, No. 4, (1996), S. 266-268**

(54) Bezeichnung: **Modenverkoppelte Multimoden-Faserlaserimpulsquelle und Verfahren**

(57) Hauptanspruch: Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen, mit:  
einem Laserresonator (11, 59, 87, 75), durch den wiederholt Lichtenergie entlang einer Laserresonatorachse (23) hindurchgeht;  
einem Stück einer optischen Multimoden-Faser (13), die mit einem Verstärkungsmaterial dotiert ist und die entlang der Laserresonatorachse (23) positioniert ist;  
einer Pumpvorrichtung (51, 69, 71) zum Anregen des Verstärkungsmaterials;  
einer Modenverkopplungsvorrichtung (35), die auf der Laserresonatorachse (23) positioniert ist; und  
einem optischen Führungselement (15), das auf der Laserresonatorachse (23) positioniert ist und das durch die optische Multimoden-Faser (13) verstärkte Licht auf vorzugsweise die fundamentale Mode der optischen Multimoden-Faser (13) beschränkt.



**Beschreibung**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf die Verstärkung von Einmoden-Lichtimpulsen in Multimoden-Faserverstärkern und insbesondere auf die Verwendung von Multimoden-Faserverstärkern zur Erhöhung der Spitzenimpulsleistung in einer modenverkoppelten Laserimpulsquelle, die zur Erzeugung ultrakurzer optischer Impulse verwendet wird.

**[0002]** Über ein Jahrzehnt hinweg sind optische selbsterdotierte Einmoden-Faserverstärker weitverbreitet verwendet worden, um die beugungsbegrenzte optische Verstärkung von optischen Impulsen bereitzustellen. Da Einmoden-Faserverstärker sehr niedrige Rauschniveaus erzeugen, keine Modendispersion verursachen und mit den optischen Transmissionslinien von Einmoden-Fasern kompatibel sind, sind fast ausschließlich sie in Telekommunikationsanwendungen verwendet worden.

**[0003]** Die Verstärkung von Impulsen mit hoher Spitzenleistung in einem beugungsbegrenzten optischen Strahl in optischen Einmoden-Faserverstärkern ist im allgemeinen durch die kleine Faserkerngröße begrenzt, die verwendet werden muß, um den Einmodenbetrieb der Faser sicherzustellen. Im allgemeinen führt das Einsetzen von Nichtlinearitäten wie beispielsweise Selbstphasenmodulation zu ernsthaften Impulsverzerrungen, sobald das Integral des Leistungsniveaus, das innerhalb der Faser vorhanden ist, mit der Fortpflanzungslänge einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Für eine konstante Spitzenleistung  $P$  innerhalb der Faser ist der tolerierbare Wert der Selbstphasenmodulation  $\Phi_{nl}$  gegeben durch

$$\Phi_{nl} = \frac{2\pi n_2 PL}{\lambda A} \leq 5,$$

worin  $A$  die Fläche der fundamentalen Mode in der Faser ist,  $\lambda$  die Betriebswellenlänge ist,  $L$  die Faserlänge und

$n_2 = 3,2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  der nichtlineare Brechungsindex in optischen Siliziumdioxid-Fasern ist.

**[0004]** Als eine Alternative zu Einmoden-Verstärkern ist die Verstärkung in optischen Multimoden-Fasern in Betracht gezogen worden. Verstärkungsexperimente in optischen Multimoden-Fasern haben jedoch im allgemeinen sowohl zu nicht-beugungsbegrenzten Ausgangssignalen als auch aufgrund der Modendispersion zu nicht akzeptabler Impulsverbreiterung geführt, da die Einbringbedingungen in die optische Multimoden-Faser und die Modenkopplung in der Multimoden-Faser nicht gesteuert worden sind.

**[0005]** Die verstärkte spontane Emission in einer Multimoden-Faser ist durch die selektive Anregung von aktiven Ionen in der Nähe des Zentrums des Faserkerns oder durch Begrenzen der aktiven Ionen auf das Zentrum des Faserkerns verringert worden, ge-

maß der US-Patentschrift US 5 187 759, deren Inhalt hiermit durch Bezugnahme enthalten ist. Da der Überlapp von Moden niedriger Ordnung in einer optischen Multimoden-Faser am höchsten ist, wenn sich die aktiven Ionen in der Nähe des Zentrums des Faserkerns befinden, wird jegliche verstärkte spontane Emission dann auch vorwiegend in den Moden niedriger Ordnung der Multimoden-Faser erzeugt werden. Als Ergebnis kann die Gesamtmenge an verstärkter spontaner Emission in einer Multimoden-Faser verringert werden, da keine verstärkte spontane Emission in den Moden höherer Ordnung erzeugt wird.

**[0006]** Als Alternative zur Erzeugung von Impulsen mit hoher Leistung ist die Verstärkung chirp-modulierter („chirped“) Impulse mit chirp-modulierten („chirped“) Bragg-Gittern verwendet worden. Eine der Beschränkungen dieser Technik liegt in der relativen Komplexität des Aufbaus.

**[0007]** Kürzlich ist die Verstärkung von Impulsen auf Spitzenleistungen höher als 10 kW in Multimoden-Faserverstärkern erzielt worden. Siehe US 5 818 630 mit dem Titel „Single-Mode Amplifiers and Compressors Based on Multi-Mode Fibers“, welches an den Anmelder der vorliegenden Anmeldung erteilt wurde und dessen Inhalt hiermit durch Bezugnahme enthalten ist. Wie dort beschrieben ist, wird die Begrenzung der Spitzenleistung, die optischen Einmoden-Faserverstärkern zu eigen ist, vermieden, indem man die vergrößerte Fläche, die durch die fundamentale Mode innerhalb von Multimoden-Fasern belegt wird, verwendet. Die vergrößerte Fläche läßt eine Vergrößerung des Energiespeicherpotentials des optischen Faserverstärkers zu, wodurch höhere Impulsenergien vor dem Einsetzen von unerwünschten Nichtlinearitäten und Verstärkungssättigung zugelassen werden. Um dies zu erreichen, werden in dieser Anmeldung die Vorteile der Konzentration des Verstärkungsmediums in das Zentrum der Multimoden-Faser, so daß die fundamentale Mode vorzugsweise verstärkt wird, beschrieben. Diese Verstärkungsbegrenzung wird ausgenutzt, um die fundamentale Mode in einer Faser mit einem großen Querschnitt durch Verstärkungsführung zu stabilisieren.

**[0008]** Zusätzlich wird in dieser Druckschrift das Schreiben von Bragg-Gittern mit chirp-modulierter Faser auf Multimoden-Fasern mit verringerter Modenkopplung, um die Leistungsbeschränkungen für lineare Impulskompression von optischen Impulsen mit hoher Leistung zu erhöhen, beschrieben. In diesem System werden Multimoden-Faserverstärker mit Doppelmantel mit relativ großflächigen Hochleistungs-Halbleiterlasern gepumpt. Ferner wird die fundamentale Mode in den Multimoden-Fasern ange-regt, indem effiziente Modenfilter verwendet werden. Indem weiterhin Multimoden-Fasern mit geringer Modenkopplung verwendet werden, kann die Fortpflan-

zung der fundamentalen Mode in den Multimoden-Verstärkern über Längen von mehreren Metern sichergestellt werden, wodurch die Verstärkung von optischen Impulsen mit hoher Leistung in dotierten Multimoden-Faserverstärkern mit Kerndurchmessern mit mehreren 10 µm zugelassen wird, während noch ein beugungsbegrenzter Ausgangsstrahl bereitgestellt wird. In diesem System wurde zusätzlich Mantelpumpen durch Diodenlaser-Anordnungen mit breiter Fläche verwendet, um Multimoden-Faserverstärker in geeigneter Weise anzuregen.

**[0009]** Sowohl aktive modenverkoppelte Laser als auch passiv modenverkoppelte Laser sind in der Lasertechnik wohlbekannt. Beispielsweise sind kompakte modenverkoppelte Laser unter Verwendung von seltenerd-dotierten Einmoden-Fasern als Quellen für ultrakurze Impulse gebildet worden. Eine besonders nützliche Faser-Impulsquelle beruht auf passiver Modenverkopplung vom Kerr-Typ. Derartige Impulsquellen sind unter Verwendung von allgemein erhältlichen Standard-Faserkomponenten zusammengestellt worden, um Impulse bei der Bandbreitengrenze von Seltenerd-Faserlasern mit Gigahertz-Repetitionsraten bereitzustellen.

**[0010]** Für sättigbare Halbleiter-Absorber sind kürzlich Anwendungen auf dem Gebiet von passiv modenverkoppelten Lasern für ultrakurze Impulse gefunden worden. Diese Vorrichtungen sind attraktiv, da sie kompakt und preiswert sind und auf einen breiten Bereich von Laserwellenlängen und -Impulsbreiten zugeschnitten werden können. Sättigbare Halbleiter-Quantentopf- und -Volumenabsorber sind auch zur Modenverkopplung von Lasern mit Farbzentren verwendet worden.

**[0011]** Ein sättigbarer Absorber hat einen intensitätsabhängigen Verlust  $I$ . Der Verlust eines Signals mit Intensität  $I$  bei einfachem Durchgang durch einen sättigbaren Absorber der Dicke  $d$  kann ausgedrückt werden als

$$I = 1 - \exp(-\alpha d),$$

worin  $\alpha$  der intensitätsabhängige Absorptionskoeffizient ist, der gegeben ist durch:

$$\alpha(I) = \alpha_0 / (1 + I/I_{\text{SAT}})$$

**[0012]** Hier ist  $\alpha_0$  der Kleinsignal-Absorptionskoeffizient, der von dem betrachteten Material abhängt.  $I_{\text{SAT}}$  ist die Sättigungsintensität, die umgekehrt proportional zur Lebensdauer ( $\tau_A$ ) der absorbierenden Spezies in dem sättigbaren Absorber ist. Somit zeigen sättigbare Absorber bei höherer Intensität weniger Verlust.

**[0013]** Da der Verlust eines sättigbaren Absorbers intensitätsabhängig ist, wird die Impulsbreite der La-

serimpulse verkürzt, wenn sie durch den sättigbaren Absorber hindurchgehen. Die Rate, mit der die Impulsbreite der Laserimpulse verkürzt wird, ist proportional zu  $|dq_0/dI|$ , worin  $q_0$  der nichtlineare Verlust ist:

$$q_0 = I(I) - I(I = 0)$$

$I(I = 0)$  ist eine Konstante ( $= 1 - \exp(-\alpha_0 d)$ ) und als Einfügungsverlust bekannt. Wie hier definiert, nimmt der nichtlineare Verlust  $q_0$  eines sättigbaren Absorbers mit zunehmender Intensität  $I$  ab (sein negativer Wert nimmt zu).  $|dq_0/dI|$  bleibt im wesentlichen konstant, bis sich  $I$   $I_{\text{SAT}}$  annähert, wobei dieser Wert im Ausbleichbereich, d. h. bei  $I \gg I_{\text{SAT}}$  im wesentlichen zu Null wird.

**[0014]** Damit ein sättigbarer Absorber zufriedenstellend als ein modenverkoppelndes Element wirkt, sollte er eine Lebensdauer (d. h. die Lebensdauer des oberen Zustands der absorbierenden Spezies), einen Einfügungsverlust  $I(I = 0)$  und einen nichtlinearen Verlust  $q_0$  haben, welche für den Laser angemessen sind. Idealerweise sollte der Einfügungsverlust niedrig sein, wobei der Wirkungsgrad des Lasers erhöht wird, während die Lebensdauer und der nichtlineare Verlust  $q_0$  eine selbststartende und stabile cw-Modenverkopplung zulassen sollten. Die Eigenschaften des sättigbaren Absorbers ebenso wie die Parameter des Laserresonators wie beispielsweise Auskoppelanteil, Restverlust und Lebensdauer des Verstärkungsmediums spielen alle eine Rolle bei der Entwicklung eines Lasers vom Start bis zur Modenverkopplung.

**[0015]** Wie bei Einmoden-Faserverstärkern ist die Spitzenleistung der Impulse von modenverkoppelten Einmoden-Lasern durch die kleine Faserkerngröße begrenzt worden, die verwendet worden ist, um den Einmodenbetrieb der Faser sicherzustellen. Zusätzlich muß in modenverkoppelten Einmoden-Faserlasern die nichtlineare Umlauf-Phasenverzögerung auch auf ungefähr  $\pi$  begrenzt werden, um die Erzeugung von Impulsen mit einem sehr großen zeitlich ausgedehnten Hintergrund, die im allgemeinen als ein Sockel („pedestal“) bezeichnet wird, zu verhindern. Für einen modenverkoppelten Standard-Einmoden-Erbiumfaserlaser, der bei 1,55 µm arbeitet, mit einem Kerndurchmesser von 10 µm und einer Umlauf-Resonatorlänge von 2 m, was einer Impuls-Repetitionsrate von 50 MHz entspricht, ist die maximale Oszillationsspitzenleistung somit ungefähr 1 kW.

**[0016]** Der Langzeitbetrieb von modenverkoppelten Einmoden-Faserlasern wird bequemerweise sichergestellt, indem man einen gegenüber Umwelteinflüssen stabilen Laserresonator wie in dem US-Patent US 5 689 519 mit dem Titel „Environmentally Stable Passively Modelocked Fiber Laser Pulse Source“, das an den Anmelder der vorliegenden Anmeldung

erteilt wurde und dessen Inhalt hiermit durch Bezugnahme enthalten ist, beschrieben ist, verwendet. Der in dieser Druckschrift beschriebene Laser minimiert durch Umwelteinflüsse hervorgerufene Fluktuationen des Polarisationszustands am Ausgang der Einmoden-Faser. In den beschriebenen Ausführungsformen wird dies erreicht, indem ein Paar Faraday-Drehvorrichtungen an gegenüberliegenden Enden des Laserresonators eingesetzt wird, um lineare Phasenabweichungen zwischen den Polarisations-Eigenmoden der Faser zu kompensieren.

**[0017]** Kürzlich ist die Zuverlässigkeit von Einmoden-Faserlasern mit hoher Leistung, die durch sättigbare Absorber modenverkoppelt sind, stark verbessert worden, indem man nichtlineare Leistungs-Begrenzungsvorrichtungen durch Einbringen von geeigneten Zwei-Photonen-Halbleiter-Absorptionseinrichtungen in den Laserresonator realisiert hat, wodurch die Spitzenleistung der schädigenden Q-geschalteten Impulse, die oft beim Starten der Modenverkopplung und bei der Anwesenheit von Fehlaustrichtungen bzw. Fehlalignierungen des Laserresonators beobachtet worden sind, minimiert worden sind, siehe US-Patentanmeldung Nr. 09/149 368, die am 8. September 1998 vom Anmelder der vorliegenden Anmeldung eingereicht wurde, mit dem Titel „Resonant Fabry-Perot Semiconductor Saturable Absorbers and Two-Photon Absorption Power Limiters“ US 6252802 B1 und deren Inhalt hiermit durch Bezugnahme enthalten ist.

**[0018]** Um die von modenverkoppelten Einmoden-Faserlasern erhältliche Impulsenergie zu erhöhen, ist die Oszillation von chirp-modulierten Impulsen innerhalb des Laserresonators verwendet worden, siehe M. Hofer et al., Opt. Lett., 1992 Bd. 17, Seiten 807 bis 809. Als Folge werden die Impulse zeitlich ausgedehnt, wodurch eine signifikante Verringerung der Spitzenleistung innerhalb des Faserlasers bewirkt wird. Die Impulse können jedoch zeitlich bis hinab zu annähernd der Bandbreitengrenze außerhalb des Laserresonators komprimiert werden. Aufgrund der sich ergebenden hohen Spitzenleistung müssen optische dispersive Volumen-Verzögerungsleitungen für die Impulskompression verwendet werden. Für Neodym-Faserlaser können Impulsbreiten in der Größenordnung von 100 fs erhalten werden.

**[0019]** Die Impulsenergie von modenverkoppelten Einmoden-Faserlasern ist auch erhöht worden, indem chirp-modulierte Fasergitter verwendet wurden. Der Wert der negativen Dispersion von chirp-modulierten Fasergittern ist groß, wobei die Impulse innerhalb des Laserresonators dispersiv verbreitert werden, wodurch somit ihre Spitzenleistung verringert wird und was auch zur Oszillation von Impulsen mit hoher Energie innerhalb den Einmoden-Faserlasern führt.

**[0020]** Siehe US 5 450 427 mit dem Titel „Technique for the Generation of Optical Pulses in Mode-Locked Lasers by Dispersive Control of the Oscillation Pulse Width“ und US-Patent US 5 627 848 mit dem Titel „Apparatus for Producing Femtosecond and Picosecond Pulses from Fiber Lasers Cladding Pumped with Broad Area Diode Laser Arrays“, die beide dem Anmelder der vorliegenden Anmeldung erteilt wurden und deren Inhalt hiermit durch Bezugnahme enthalten ist. In diesen Systemen sind die erzeugten Impulse Bandbreiten-begrenzt, obwohl die typischen Oszillations-Impulsbreiten in der Größenordnung von einigen wenigen ps sind.

**[0021]** Obwohl die dispersive Verbreiterung der Oszillations-Impulsbreite innerhalb eines Einmoden-Faserlaserresonators im Vergleich mit einem „Standard“-Solitonen-Faserlaser die Oszillations-Impulsenergie erhöht, erhöht sie jedoch nicht die Oszillations-Spitzenleistung. Die maximale Spitzenleistung, die mit diesen Systemen direkt von dem Faserlaser erzeugt wird, ist noch auf ungefähr 1 kW begrenzt.

**[0022]** Ein weiteres hoch integrierbares Verfahren zur Erhöhung der Spitzenleistung von modenverkoppelten Lasern beruht auf der Verwendung von chirp-moduliertem, periodisch gepoltem  $\text{LiNbO}_3$  (chirp-moduliertes PPLN). Chirp-moduliertes PPLN läßt die simultane Impulskompression und Frequenzverdopplung eines optisch chirp-modulierten Impulses zu, siehe US-Patentanmeldung Nr. 08/845 410, die am 25. April 1997 vom Anmelder der vorliegenden Anmeldung eingereicht wurde, mit dem Titel „Use of Aperiodic Quasi-Phase-Matched Gratings in Ultrashort Pulse Sources“, deren Inhalt hiermit durch Bezugnahme enthalten ist (US 5867304 A). Es sind jedoch im allgemeinen Spitzenleistungen in der Größenordnung von mehreren kW erforderlich, damit chirpmoduliertes PPLN eine Impulskompression von ungefähr 3 ps bis 300 fs und eine Frequenzverdopplung mit hohem Umwandlungswirkungsgrad erzeugt. Solche hohe Spitzenleistungen sind typischerweise außerhalb des Bereichs von modenverkoppelten Einmoden-Erbium-Faserlasern.

**[0023]** Diodenlaser-Anordnungen mit breiter Fläche sind zum Pumpen von modenverkoppelten Einmoden-Faserlasern verwendet worden, wobei sehr kompakte Laserresonatorgestaltungen möglich waren. Das Pumplicht wurde durch eine V-förmige Einkerbung von der Seite der Doppelmantel-Faser her injiziert, eine Technik, die typischerweise als Seiten-Pumpen bezeichnet wird. Solche Oszillatorgestaltungen haben jedoch den Nachteil, daß die Spitzenleistung aufgrund der Einmoden-Struktur der Oszillatorfaser beschränkt ist.

**[0024]** Es ist auch vorgeschlagen worden, daß ein nahezu beugungsbegrenzter Ausgangsstrahl von einem Multimoden-Faserlaser erhalten werden kann,

wenn man die Faserlänge kürzer als 15 mm hält und selektiv eine maximale Menge an Rückkopplung für die fundamentale Mode der optischen Faser bereitstellt („Efficient laser operation with nearly diffraction-limited output from a diodepumped heavily Nd-doped multimode fiber”, Optics Letters, Bd. 21, S. 266 bis 268 (1996), deren Inhalt hiermit durch Bezugnahme enthalten ist). Bei dieser Technik ist jedoch ernsthafte bzw. starke Modenkopplung ein Problem gewesen, da die verwendeten Multimoden-Fasern typischerweise Tausende von Moden unterstützen. Auch ist nur ein Luftspalt zwischen der Endfläche der Multimoden-Faser und einem Laserspiegel für die Modenselektion vorgeschlagen worden. Daher ist eine nur sehr schlechte Moden-Unterscheidung erhalten worden, was zu einer schlechten Strahlqualität führte.

**[0025]** Während der Betrieb von optischen Verstärkern, insbesondere bei Anwesenheit von großen Impfsignalen, nicht sehr empfindlich gegenüber der Anwesenheit von Störreflexionen ist, hängt die Stabilität von modenverkoppelten Lasern kritisch von der Minimierung von Störreflexionen ab. Jegliche Streureflexionen erzeugen Unter-Laserresonatoren innerhalb eines Oszillators und führen zu Injektionssignalen für den cw-Betrieb eines Laserresonators und verhindern somit das Einsetzen der Modenverkopplung. Man nimmt allgemein an, daß für Fabry-Pérot-Festkörper-Laserresonatoren eine Unterdrückung der laserresonatorinternen Reflexionen auf ein Niveau  $\ll 1\%$  (bezüglich der Intensität) erforderlich ist, um das Einsetzen der Modenverkopplung zu ermöglichen.

**[0026]** Man kann sich vorstellen, daß die laserresonatorinternen Reflexionen, die in modenverkoppelten Standard-Lasern von Betracht sind, konzeptuell äquivalent zur Modenkopplung in Multimoden-Fasern sind. Jegliche Modenkopplung in Multimoden-Fasern erzeugt natürlich auch einen Unter-Laserresonator mit einem cw-Injektionssignal, das zu der Menge an Modenkopplung proportional ist. Es ist jedoch sehr schwierig, eine Unterdrückung der Modenkopplung auf ein Niveau  $\ll 1\%$  bei allen Multimoden-Faser-Unstetigkeiten zu erzielen. Aufgrund von optischen Aberrationen lassen selbst gut korrigierte Optiken typischerweise die Anregung der fundamentalen Mode in Multimoden-Fasern nur mit einem maximalen Wirkungsgrad von ungefähr 95% zu. Daher ist man bis jetzt der Überzeugung gewesen, daß Modenverkopplung einer Multimoden-Faser unmöglich ist, und bis jetzt ist kein stabiler Betrieb eines modenverkoppelten Multimoden-Faserlasers gezeigt worden.

**[0027]** Die Erfindung beseitigt die vorstehend erwähnten, mit den Begrenzungen der Spitzenleistung in modenverkoppelten Lasern verbundenen Schwierigkeiten und stellt einen modenverkoppelten Multi-

moden-Faserlaser bereit.

**[0028]** Gemäß der vorliegenden Erfindung werden der Laser nach Anspruch 1 und das Verfahren nach Anspruch 51 bereitgestellt.

**[0029]** Dieser Laser nutzt Resonatorgestaltungen aus, die die stabile Erzeugung von Impulsen mit hoher Spitzenleistung von modenverkoppelten Multimoden-Faserlasern zulassen, wobei die Begrenzungen der Spitzenleistung von herkömmlichen anodenverkoppelten Einmoden-Faserlasern in grossem Masse ausgedehnt werden. Modenverkopplung kann durch Einschieben eines sättigbaren Absorbers in den Laserresonator und durch Einschieben von einem oder mehreren Modenfiltern, um die Oszillation der fundamentalen Mode in der Multimoden-Faser sicherzustellen, hervorgerufen werden. Die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung des Absorbers kann durch Einschieben einer zusätzlichen optischen Halbleiter-Leistungsebegrenzungseinrichtung in den Laserresonator minimiert werden. Die kürzesten Impulse können auch erzeugt werden, indem man die nichtlineare Polarisationsentwicklung innerhalb der Faser ausnutzt. Die Langzeitstabilität der Laserresonator-Konfiguration wird sichergestellt, indem man einen gegenüber Umwelteinflüssen stabilen Laserresonator verwendet. Pumplicht von einem Diodenlaser mit grosser Fläche kann in die Multimoden-Faser durch Verwenden einer Mantel-Pumptchnik eingebracht werden.

**[0030]** Gemäß der Lehre der vorliegenden Erfindung kann ein modenverkoppelter Faserlaser aufgebaut werden, mit dem beispielsweise nahezu Bandbreiten-begrenzte 360 fs-Impulse mit einer durchschnittlichen Leistung von 300 mW bei einer Repetitionsrate von 66,7 MHz erhalten werden. Die Spitzenleistung dieser beispielhaften Impulse wird auf ungefähr 6 kW geschätzt.

**[0031]** Im folgenden werden die bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung unter Bezugnahme der beiliegenden Zeichnungen beschrieben, in denen durchgängig gleiche Elemente durch identische Bezugszeichen bezeichnet werden.

**[0032]** Fig. 1 ist eine schematische Veranschaulichung, die den Aufbau einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt, bei der End-Pumpen zum Injizieren von Pumplicht in die Multimoden-Faser verwendet wird.

**[0033]** Fig. 2 ist eine graphische Darstellung, die die typische Autokorrelation vom Impulsen zeigt, die gemäß der in Fig. 1 dargestellten Ausführungsform der Erfindung erzeugt worden sind.

**[0034]** Fig. 3 ist eine graphische Darstellung, die das typische Impulsspektrum zeigt, welches gemäß

der in [Fig. 1](#) dargestellten Ausführungsform der Erfindung erzeugt wird.

**[0035]** [Fig. 4](#) ist eine schematische Veranschaulichung, die den Aufbau einer alternativen bevorzugten Ausführungsform unter Verwendung einer Seiten-Pumpeinrichtung zum Injizieren von Pumplicht in die Multimoden-Faser zeigt.

**[0036]** [Fig. 5](#) ist eine schematische Veranschaulichung einer alternativen Ausführungsform, bei der ein Stück einer Faser mit positiver Dispersion verwendet wird, um chirp-modulierte Impulse in den Laserresonator einzuführen.

**[0037]** [Fig. 6](#) ist eine schematische Veranschaulichung einer alternativen Ausführungsform, bei der chirp-modulierte Fasergitter mit negativer Dispersion in dem Laserresonator verwendet werden, um nahezu Bandbreiten-begrenzte Impulse mit hoher Energie zu erzeugen.

**[0038]** Die [Fig. 7a](#) und [Fig. 7b](#) veranschaulichen Querschnitte von polarisationserhaltenden Multimoden-Fasern, die verwendet werden können, um gegenüber Umwelteinflüssen stabile Laserresonatoren bei Abwesenheit von Faraday-Drehvorrichtungen aufzubauen.

**[0039]** [Fig. 8](#) ist eine schematische Veranschaulichung einer alternativen Ausführungsform, bei der eine der in den [Fig. 7a](#) und [Fig. 7b](#) veranschaulichten Fasern verwendet wird.

**[0040]** Die [Fig. 9a](#), [Fig. 9b](#) und [Fig. 9c](#) veranschaulichen die Art, auf die die fundamentale Mode der Multimoden-Fasern gemäß der vorliegenden Erfindung an die Mode einer Einmoden-Faser angepaßt werden kann. Diese umfassen ein optisches Volumen-Abbildungssystem wie in [Fig. 9a](#) gezeigt, eine Spleiß-Verbindungsstelle zwischen Multimoden- und Einmoden-Faser, wie in [Fig. 9b](#) gezeigt, und einen konischen Querschnitt („tapered section“) der Multimoden-Faser, wie in [Fig. 9c](#) veranschaulicht.

**[0041]** [Fig. 10](#) ist eine schematische Veranschaulichung einer alternativen Ausführungsform, bei der ein Fasergitter verwendet wird, um vorwiegend die fundamentale Mode einer Multimoden-Faser zu reflektieren.

**[0042]** [Fig. 11](#) ist eine schematische Veranschaulichung einer alternativen Ausführungsform, bei der aktive oder aktiv-passive Modenverkopplung zur Modenverkopplung des Multimoden-Lasers verwendet wird.

**[0043]** [Fig. 1](#) veranschaulicht den erfindungsgemäßen modenverkoppelten Laserresonator 11, bei dem ein langes Stück einer verstärkenden Multimo-

den-Faser 13 innerhalb des Laserresonators verwendet wird, um ultrakurze optische Impulse mit hoher Leistung zu erzeugen. Der hier verwendete Ausdruck „ultrakurz“ bedeutet eine Impulsbreite unterhalb 100 ps. Die in dem Beispiel gezeigte Faser 13 ist eine 1,0 m lange nicht-doppelbrechende  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ -dotierte Multimoden-Faser. Typischerweise wird eine Faser als eine Multimoden-Faser betrachtet, wenn der V-Wert 2,41 überschreitet, d. h., wenn sich Moden zusätzlich zur fundamentalen Mode in der optischen Faser fortpflanzen können. Diese Faser wird auf eine Trommel mit einem Durchmesser von 5 cm aufgewickelt, obwohl Biegedurchmesser von 1,5 cm oder sogar kleiner verwendet werden können, ohne die Modenverkopplung zu behindern. Aufgrund der  $\text{Er}^{3+}$ -Dotierung hat der Faserkern in diesem Beispiel einen Absorptionskoeffizienten von ungefähr 40 dB/m bei einer Wellenlänge von 1,53  $\mu\text{m}$ . Die  $\text{Yb}^{3+}$ -Kodotierung bewirkt einen durchschnittlichen Absorptionskoeffizienten von 4,3 dB/m innerhalb des Mantels bei einer Wellenlänge von 980 nm. Die Faser 13 hat eine numerische Apertur von 0,20 und einen Kerndurchmesser von 16  $\mu\text{m}$ . Die Außendurchmesser des Mantels der Faser 13 ist 200  $\mu\text{m}$ . Die Faser 13 ist mit einem Polymer mit niedrigem Index beschichtet, wodurch für den Mantel eine numerische Apertur von 0,40 erzeugt wird. Eine 10 cm lange Corning Leaf Einmoden-Faser 15 wird thermisch konisch verjüngt („tapered“), wobei ein Kerndurchmesser von ungefähr 14  $\mu\text{m}$  erzeugt wird, um einen optimalen Betrieb als Modenfilter sicherzustellen, und dieses lange Stück wird auf ein erstes Ende 17 der Multimoden-Faser 13 schmelz-verspleißt.

**[0044]** Bei dieser beispielhaften Ausführungsform ist der Laserresonator 11 zwischen einem ersten Spiegel 19 und einem zweiten Spiegel 21 gebildet. Man wird erkennen, daß andere Laserresonator-Konfigurationen für immer wieder umlaufende Impulse wohl bekannt sind und verwendet werden können. In diesem Beispiel definieren die Spiegel 19, 21 eine optische Achse 23, entlang der die Laserresonator-Elemente ausgerichtet sind.

**[0045]** Der Laserresonator 11 enthält ferner ein Paar Faraday-Drehvorrichtungen 25, 27 zur Kompensation von linearen Phasenabweichungen zwischen den Polarisations-Eigenmoden der Faser, wodurch sichergestellt wird, daß der Laserresonator gegenüber Umwelteinflüssen stabil bleibt. Wie hier verwendet, bezieht sich der Ausdruck „gegenüber Umwelteinflüssen stabil“ auf eine Impulsquelle, die im wesentlichen immun gegenüber einer Abnahme der Impulserzeugung aufgrund von Umwelteinflüssen wie beispielsweise Temperaturabweichungen ist und die höchstens nur geringfügig empfindlich gegenüber Druckschwankungen ist. Die Verwendung von Faraday-Drehvorrichtungen zur Sicherstellung einer Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen ist in der US 5 689 519, deren Inhalt durch Bezugnahme hier aufge-

nommen worden ist, detaillierter erklärt.

**[0046]** Ein Polarisations-Strahlteiler **29** auf der Achse **23** des Laserresonators **11** stellt den Betrieb des Laserresonators **11** bei einer Polarisation sicher, und liefert das Ausgangssignal **30** von dem Laserresonator. Eine Halbwellenplatte **31** und eine Viertelwellenplatte **33** werden verwendet, um lineare Phasenverzögerungen in den Laserresonator einzubringen, wobei eine Polarisationssteuerung bereitgestellt wird, die die Optimierung der Polarisationsentwicklung innerhalb des Laserresonators **11** für die Modenverkopplung zuläßt.

**[0047]** Um eine Modenverkopplung zu bewirken, ist der Laserresonator **11** als ein Fabry-Perot-Resonator gebildet, indem ein sättigbarer Absorber **35** an dem Ende des Laserresonators in der Nähe des Spiegels **19** eingebracht wird. Der sättigbare Absorber **35** ist vorzugsweise als eine 0,75 µm dicke InGaAsP-Schicht auf einer Oberfläche eines Substrats gewachsen. Die Bandkante des sättigbaren InGaAsP-Absorbers **39** ist vorzugsweise auf 1,56 µm gewählt, die Ladungsträger-Lebensdauer beträgt typischerweise 5 ps, und die Sättigungsenergiedichte beträgt 100 MW/cm<sup>2</sup>.

**[0048]** In diesem Beispiel umfaßt das Substrat, das den sättigbaren Absorber **35** trägt, mit einer Antireflexionsschicht versehenes InP **37** von hoher Qualität, wobei die mit einer Antireflexionsschicht versehene Oberfläche **39** gegenüber der Seite des offenen Endes des Laserresonators **11** liegt. Das InP-Substrat ist transparent gegenüber Ein-Photonen-Absorption des Signallichts bei 1,56 µm, Zwei-Photonen-Absorption tritt jedoch auf. Dieser Zwei-Photonen-Absorber **39** wird als eine nichtlineare Leistungsbegrenzungseinrichtung verwendet, um den sättigbaren Absorber **35** zu schützen.

**[0049]** In dieser beispielhaften Ausführungsform ist der Spiegel **19** durch Abscheiden eines Goldfilms auf die dem Zwei-Photonen-Absorber **39** gegenüberliegende Oberfläche des sättigbaren InGaAsP-Absorbers **35** gebildet. Die kombinierte Struktur aus dem sättigbaren Absorber **35**, dem Zwei-Photonen-Absorber **37** und dem Spiegel **19** stellt ein Reflexionsvermögen von 50% bei 1,56 µm bereit. Die dem sättigbaren Absorber **35** gegenüberliegende Oberfläche des Goldfilm-Spiegels **19** ist an einem Saphirfenster **41** zur Wärmeableitung der kombinierten Absorber/Spiegel-Anordnung angebracht.

**[0050]** Der Laserstrahl von der Faser **15** wird durch eine Linse **43** parallel gerichtet und nach Drehung durch die Faraday-Drehvorrichtung **25** durch eine Linse **45** wieder auf die mit einer Antireflexionsbeschichtung versehene Oberfläche **39** des Zwei-Photonen-Absorbers **37** fokussiert. Die Fleckgröße des Laserstrahls auf dem sättigbaren Absorber **35** kann

durch Variieren der Position der Linse **45** oder durch Verwendung von Linsen mit verschiedenen Brennweiten eingestellt werden. Weitere Fokussierlinsen **47** und **49** in dem Laserresonator **11** unterstützen die bessere Abbildung des Lasersignals auf die Multimoden-Faser **13**.

**[0051]** Licht von einer Pumplichtquelle **51**, wie beispielsweise einer Laserquelle, mit einer Wellenlänge in der Nähe von 980 nm und einer Ausgangsleistung von 5 W wird durch ein Faserbündel **57** mit einem Außendurchmesser von 375 µm geleitet. Dieses Pumplicht wird in das der Einmoden-Faser **17** entgegengesetzte Ende **53** der Multimoden-Faser **13** injiziert. Das Pumplicht wird in den Laserresonator **11** über eine Pumpsignal-Injektionsvorrichtung **55** wie beispielsweise einen dichroitischen Strahlteiler für 980/1550 nm eingekoppelt. Linsen **47** und **48** sind für das Einkoppeln der Pumpleistung von dem Faserbündel **57** in den Mantel der Multimoden-Faser optimiert.

**[0052]** Der M<sup>2</sup>-Wert des Strahls beim Ausgang **30** dieser beispielhaften Ausführungsform beträgt typischerweise ungefähr 1,2. Unter der Annahme, daß die Beeinträchtigung des M<sup>2</sup>-Werts hauptsächlich auf die nicht perfekte Spleiß-Verbindung zwischen der Multimoden-Faser **13** und der Einmoden-Modenfilterfaser **15** zurückzuführen ist, kann abgeschätzt werden, daß die Einmoden-Modenfilterfaser **15** die fundamentale Mode der Multimoden-Faser **13** mit einem Wirkungsgrad von ungefähr 90% angeregt hat.

**[0053]** Modenverkopplung kann erreicht werden, indem man die Fokussierung des Laserstrahls auf den sättigbaren Absorber **35** optimiert und indem man die Orientierung der resonatorinternen Wellenplatten **31**, **33** optimiert, so daß ein bestimmter Grad der nichtlinearen Polarisationsentwicklung zugelassen wird. Der modenverkoppelte Betrieb eines Multimoden-Faserlasersystems ohne nichtlineare Polarisationsentwicklung kann jedoch auch erreicht werden, indem man die Menge an Moden-Vermischung in der Multimoden-Faser **13** minimiert und durch eine Optimierung des sättigbaren Absorbers **35**.

**[0054]** Die Impulse, die durch die beispielhafte Ausführungsform von **Fig. 1** erzeugt werden, werden eine Repetitionsrate von 66,7 MHz haben, mit einer durchschnittlichen Ausgangsleistung von 300 mW bei einer Wellenlänge von 1,535 µm, was eine Impulsenergie von 4,5 nJ ergibt. Eine typische Autokorrelation der Impulse ist in **Fig. 2** gezeigt. Eine typische Impuls-Halbwertsbreite von 360 fsec (wobei eine sech<sup>2</sup>-Impulsform angenommen wird) wird erzeugt. Das entsprechende Impulsspektrum ist in **Fig. 3** gezeigt. Die Autokorrelationsbreite liegt innerhalb eines Faktors von 1,5 der Bandbreitengrenze wie aus dem Impulsspektrum berechnet, was die relativ hohe Qualität der Impulse anzeigt.

**[0055]** Aufgrund der Multimoden-Struktur des Oszillators ist das Impulsspektrum stark moduliert und daher zeigt die Autokorrelation eine beträchtliche Energiemenge in einem Impulssockel an. Es kann abgeschätzt werden, daß die Energiemenge in dem Sockel ungefähr 50% beträgt, was umgekehrt eine Impulsspitzenleistung von 6 kW ergibt, ungefähr 6-mal größer als das, was typischerweise mit Einmoden-Fasern bei einer ähnlichen Impuls-Repetitionsrate erhalten wird.

**[0056]** Vernachlässigt man die Menge an Selbstphasenmodulation in einem Durchgang durch die Multimoden-Faser **13** und jegliche Selbstphasenmodulation in dem Modenfilter **15** und nimmt man einen linearen Anstieg der Impulsleistung in der Multimoden-Faser **13** in dem zweiten Durchgang an und nimmt man eine effektive Fläche der fundamentalen Mode in der Multimoden-Faser **13** von  $133 \mu\text{m}^2$  an, so wird die nichtlineare Phasenverzögerung in dem Multimoden-Oszillator aus der vorstehenden ersten Gleichung zu  $\Phi_{nl} = 1,45 \pi$  berechnet, was dicht an der erwarteten typischen maximalen nichtlinearen Verzögerung von passiv modenverkoppelten Lasern liegt.

**[0057]** Die Modulation des erhaltenen Impulsspektrums ebenso wie die Menge des erzeugten Sockels hängt von der Ausrichtung des Spiegels **21** ab. Im allgemeinen führt die optimierte Modenanpassung des optischen Strahls zurück in die fundamentale Mode der Multimoden-Faser zur besten Laserstabilität und zu einer Verringerung der Menge des Sockels und der Modulation des Impulsspektrums. Aus diesem Grund kann eine optimierte Impulsqualität erhalten werden, indem man die Spleiß-Verbindung zwischen der Einmoden-Filterfaser **15** und der Multimoden-Faser **13** verbessert. Aus einfachen Überlappungsintegralen kann berechnet werden, daß ein optimal konisch sich verjüngender Querschnitt der Corning SMF-25-Faser **15** zu einer Anregung der fundamentalen Mode in der Multimoden-Faser **13** mit einem Wirkungsgrad von 99% führen wird. Somit kann in einem optimierten System jegliches Signal in den Moden höherer Ordnung auf ungefähr 1% reduziert werden.

**[0058]** Eine alternative Ausführungsform der Erfindung ist in **Fig. 4** veranschaulicht. Wie durch die identischen Elemente und Bezugszeichen angegeben, ist der Großteil der Laserresonator-Anordnung in dieser Figur identisch zu der in **Fig. 1** gezeigten. Gemäß dieser Ausführungsform wird ein hoch integrierter Laserresonator **59** durch Verwenden einer Seiten-Pumpvorrichtung zum Injizieren von Pumplicht in die Multimoden-Faser **13** bereitgestellt. Ein Paar Faserkoppler **61, 63**, wie im Stand der Technik wohl bekannt, injizieren Licht von einem jeweiligen Paar Faserbündel **65** und **67** in den Mantel der Multimoden-Faser **13**. Die Faserbündel sind ähnlich zu dem in **Fig. 1** gezeigten Bündel **57** und übertragen je-

weils Licht von einem Paar Pumpquellen **69** bzw. **71**. Alternativ können die Faserbündel **65, 67** und die Faserkoppler **61, 63** durch eine Lichtinjektion in den Mantel der Multimoden-Faser über eine V-förmige Einkerbung auf eine Art, die im Stand der Technik wohl bekannt ist, ersetzt werden. Ein sättigbarer Absorber **73** kann die Elemente **35, 37, 39** und **42**, die in **Fig. 1** gezeigt sind, umfassen, oder er kann von jeglicher anderer wohl bekannter Gestaltung sein, so lange er einen hohen Schädigungs-Schwellwert bereitstellt.

**[0059]** Gemäß einer weiteren alternativen Ausführungsform, die in **Fig. 5** veranschaulicht ist, umfaßt der Laserresonator **75** ein Element mit positiver Dispersion. Wie bei **Fig. 4** bezeichnen in **Fig. 5** ähnliche Bezugszeichen Elemente, die unter Bezugnahme auf **Fig. 1** im Detail beschrieben sind. Gemäß dieser Ausführungsform ist ein Abschnitt einer Einmoden-Faser **77** mit positiver Dispersion zwischen dem zweiten Spiegel **21** und der Linse **49** angebracht. Auf ähnliche Weise könnte ein Abschnitt einer Faser mit positiver Dispersion an dem Ende **53** der Multimoden-Faser **13** oder an dem Ende des Einmoden-Modenfilters **15**, welches der Linse **43** gegenüberliegt, über eine Spleiß-Verbindung angebracht sein. Fasern mit positiver Dispersion haben typischerweise eine kleine Kernfläche und können die von einem Laser erhältliche Impulsenergie begrenzen. Die in **Fig. 5** gezeigte Ausführungsform dient dazu, die in die Faser mit positiver Dispersion **77** injizierte Spitzenleistung zu verringern und somit die Impuls-Ausgangsenergie zu maximieren. Dies wird erreicht, indem man an dem Polarisations-Strahlteiler **29** 90 bis 99% der Lichtenergie entzieht.

**[0060]** Bei der Ausführungsform von **Fig. 5** kann die Gesamtdispersion innerhalb des Laserresonators auf Null eingestellt werden, wobei Hochleistungs-Impulse mit einer größeren Bandbreite erzeugt werden. Alternativ können, indem man die Dispersion des gesamten Laserresonators so einstellt, daß sie positiv ist, durch den Laser chirp-modulierte Impulse mit deutlich erhöhten Impulsenergien erzeugt werden.

**[0061]** Die Verwendung von zwei Einmoden-Modenfilterfasern **15, 77** ist auch vorteilhaft hinsichtlich einer Vereinfachung der Ausrichtung des Lasers. Typischerweise müssen, um Moden-Speckles zu minimieren, optische Signale mit breiter Bandbreite verwendet werden, um die Modenfilterfasern mit der Multimoden-Faser auszurichten. Die Verwendung von zwei Modenfilterfasern **15, 77** läßt die Verwendung von verstärkten spontanen Emissionssignalen, die direkt in der Multimoden-Faser erzeugt worden sind, für eine iterative Ausrichtung von beiden Modenfiltern **15, 77** zu.

**[0062]** Die in dem Laserresonator **75** mit einer insgesamt positiven Dispersion erzeugten chirp-modu-



lierten Impulse können auf annähernd die Bandbreitengrenze bei der frequenzverdoppelten Wellenlänge hinab komprimiert werden, indem man chirp-moduliertes, periodisch gepoltes  $\text{LiNbO}_3$  **79** für die Erzeugung der Summenfrequenz auf eine Art verwendet, die im Stand der Technik wohlbekannt ist. Das chirp-modulierte, periodisch gepolte  $\text{LiNbO}_3$  **79** empfängt das Laserresonator-Ausgangssignal von dem Polarisations-Strahlteiler **29** durch einen optischen Isolator **81**. In diesem Fall treten aufgrund der Hochleistungseigenschaften von Multimoden-Faseroszillatoren höhere Umwandlungswirkungsgrade bei der Frequenzverdopplung im Vergleich zu denen auf, die mit Einmoden-Faseroszillatoren ermittelt worden sind. Alternativ können zum Komprimieren der chirp-modulierten Impulse bis hinab zur Bandbreitengrenze anstelle des chirp-modulierten, periodisch gepolten  $\text{LiNbO}_3$  **79** volumenoptische Dispersionskompensationselemente verwendet werden.

**[0063]** Allgemein kann jede nichtlineare optische Mischtechnik wie beispielsweise Frequenzverdopplung, Raman-Erzeugung, Vier-Wellenmischen usw. anstelle des chirp-modulierten, periodisch gepolten  $\text{LiNbO}_3$  **79** verwendet werden, um die Frequenz des Ausgangssignals des Multimoden-Faseroszillators **13** in eine andere Wellenlänge umzuwandeln. Darüber hinaus ist der Umwandlungswirkungsgrad dieser nichtlinearen optischen Mischverfahren im allgemeinen proportional zur Lichtintensität oder zum Quadrat der Lichtintensität. Somit wird der kleine Restsockel, der in einem Multimoden-Oszillator vorhanden ist, mit stark reduziertem Wirkungsgrad im Vergleich mit dem zentralen Hauptimpuls umgewandelt werden, und daher können Impulse mit viel höherer Qualität erhalten werden.

**[0064]** Wie in der alternativen Ausführungsform von **Fig. 6** gezeigt, können sehr hochenergetische optische Impulse auch erhalten werden, indem man ein chirp-moduliertes Fasergitter, wie beispielsweise ein Bragg-Gitter **83**, mit negativer Dispersion in den Laserresonator **85** einschiebt. Solch ein System erzeugt typischerweise annähernd Bandbreitenbegrenzte Impulse mit ps-Länge und hoher Energie. Aufgrund der verwendeten Multimoden-Faser werden im Vergleich mit Einmoden-Faseroszillatoren viel größere Spitzenleistungen erzeugt. Hier wird das Fasergitter **83** hinter dem Polarisations-Strahlteiler **29** eingeschoben, wobei ein selbst bei Anwesenheit der nicht polarisationserhaltenden Multimoden-Faser **13** gegenüber Umwelteinflüssen stabiler Laserresonator erhalten wird.

**[0065]** Bei jeder der Ausführungsformen der Erfindung ist es vorteilhaft, die Sättigung des Multimoden-Faserverstärkers **13** durch verstärkte spontane Emission, die in den Moden höherer Ordnung erzeugt wird, zu minimieren. Dies kann erreicht werden, indem man die Seltenerd-Dotierung zentral auf

einen Bruchteil des Kerndurchmessers beschränkt.

**[0066]** Eine optische polarisationserhaltende Multimoden-Faser kann aufgebaut werden, indem man einen elliptischen Faserkern verwendet, oder indem man spannungserzeugende Bereiche an den Mantel der Multimoden-Faser anbringt. Beispiele für derartige Faserquerschnitte sind in den **Fig. 7a** bzw. **Fig. 7b** gezeigt. Eine polarisationserhaltende Multimoden-Faser läßt den Aufbau von gegenüber Umwelteinflüssen stabilen Laserresonatoren bei Abwesenheit von Faraday-Dreheinrichtungen vor. Ein Beispiel für solch eine Gestaltung ist in **Fig. 8** gezeigt. In diesem Fall wird das Ausgangssignal des Laserresonators **87** durch Verwenden eines teilweise reflektierenden Spiegels **89** an einem Ende des Laserresonators **87** auf eine im Stand der Technik wohlbekannte Weise bereitgestellt.

**[0067]** Um die optimale Anpassung der fundamentalen Mode der Multimoden-Faser **13** an die Mode der Einmoden-Modenfilterfaser **15** in jeder der Ausführungsformen der Erfindung sicherzustellen, kann entweder ein volumenoptisches Abbildungssystem, eine Spleiß-Verbindung zwischen der Multimoden-Faser **13** und der Einmoden-Faser **15** oder ein konisch sich verjüngender Querschnitt der Multimoden-Faser **13** verwendet werden. Beispielsweise kann sich die Multimoden-Faser **13**, entweder in der in **Fig. 7a** oder **Fig. 7b** gezeigten Form, oder in einer nicht polarisationserhaltenden Form, auf einen Außendurchmesser von 70  $\mu\text{m}$  konisch verjüngen. Dadurch wird ein Kern-Innendurchmesser von 5,6  $\mu\text{m}$  erzeugt und der Betrieb der Multimoden-Faser an dem konisch sich verjüngenden Ende bei einer Mode sichergestellt. Indem man ferner einen adiabatisch konisch sich verjüngenden Abschnitt („taper“) verwendet, kann die eine Mode der Multimoden-Faser mit einem Wirkungsgrad von fast 100% angeregt werden. Eine graphische Darstellung der drei diskutierten Verfahren zur Anregung der fundamentalen Mode in einer Multimoden-Faser **13** mit einer Einmoden-Modenfilterfaser **15** ist jeweils in den **Fig. 9a**, **Fig. 9b** und **Fig. 9c** gezeigt. Die Verwirklichung in einer Laserresonator-Gestaltung ist nicht separat gezeigt, aber die Spleiß-Verbindung zwischen der Einmoden-Faser **15** und der Multimoden-Faser **13**, die in jeder der beschriebenen Ausführungsformen gezeigt ist, kann mit jeder der in diesen Figuren gezeigten drei Alternativen aufgebaut werden.

**[0068]** **Fig. 10** zeigt eine zusätzliche Ausführungsform der Erfindung. Hier werden anstelle der Einmoden-Modenfilterfasern **15**, die in den vorhergehenden Ausführungsformen verwendet wurden, Fasergitter wie beispielsweise ein Bragg-Gitter, das direkt in die Multimoden-Faser **13** geschrieben ist, verwendet, um vorwiegend die fundamentale Mode der Multimoden-Faser **13** zu reflektieren. Licht von der Pumpquelle **51** wird durch das Fasergitter **97** injiziert, um

eine besonders einfache Gestaltung des Laserresonators **99** zu ermöglichen. Sowohl chirp-modulierte Fasergitter **97** als auch nicht chirp-modulierte Fasergitter können verwirklicht werden. (Chirp-modulierte oder nicht chirp-modulierte) Gitter mit enger Bandbreite begünstigen die Oszillation von Impulsen mit einer Bandbreite, die kleiner als die Gitterbandbreite ist.

**[0069]** Schließlich können anstelle von passiver Modenverkopplung aktive oder aktiv-passive Modenverkopplungstechniken zur Modenverkopplung von Multimoden-Fasern verwendet werden. Beispielsweise könnte ein aktiv-passiv modenverkoppeltes System einen optischen Frequenz- oder Amplitudenmodulator (wie bei der aktiven Modenverkopplungsvorrichtung) in Verbindung mit nichtlinearer Polarisationsentwicklung (wie bei der passiven Modenverkopplungsvorrichtung) umfassen, um kurze optische Impulse bei einer festen Repetitionsrate ohne einen sättigbaren Absorber zu erzeugen. Ein Diagramm einer modenverkoppelten Multimoden-Faser **13** mit einer optischen Modenverkopplungsvorrichtung **101** ist in Fig. 11 gezeigt. Auch ist ein optischer Filter **103** gezeigt, der verwendet werden kann, um das Leistungsvermögen des modenverkoppelten Lasers **105** zu steigern.

**[0070]** Im allgemeinen sind die hier beschriebenen Laserresonator-Gestaltungen beispielhaft für die bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung. Weitere Variationen sind aus den vorstehenden Diskussionen offensichtlich. Insbesondere werden optische Modulatoren, optische Filter, sättigbare Absorber und Elemente zur Polarisationssteuerung in geeigneter Weise an jedem Ende des Laserresonators eingeschoben. Gleichmaßen kann das Auskoppelsignal an einem optischen Spiegel, einem Polarisations-Strahlteiler oder auch von einem optischen Faserkoppler, der an dem Einmoden-Faserfilter **15** angebracht ist, entzogen werden. Die Pumpleistung kann auch von jedem Ende der Multimoden-Faser **13** oder durch die Seite der Multimoden-Faser **13** in jeder der diskutierten Laserresonator-Konfigurationen eingekoppelt werden. Gleichmaßen können all die diskutierten Laserresonatoren mit jeder Menge an Dispersion betrieben werden. Chirp- und nicht chirp-modulierte Gitter können an jedem Laserresonatorende eingebaut werden, wobei sie als optische Filter wirken und auch dazu dienen, die Dispersions-eigenschaften des Laserresonators zu verändern.

**[0071]** Ein Laser nutzt eine Laserresonator-Gestaltung aus, die die stabile Erzeugung von Impulsen mit hoher Spitzenleistung von modenverkoppelten Multimoden-Faserlasern zulässt, wobei die Begrenzungen der Spitzenleistung von herkömmlichen modenverkoppelten Einmoden-Faserlasern in großem Maße ausgedehnt werden. Modenverkopplung kann durch Einschieben eines sättigbaren Absorbers in den La-

serresonator und durch Einschieben von einem oder mehreren Modenfiltern bewirkt werden, wobei die Oszillation der fundamentalen Mode in der Multimoden-Faser sichergestellt wird. Die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung des Absorbers kann durch Einschieben einer zusätzlichen optischen Halbleiter-Leistungsbegrenzungseinrichtung in den Laserresonator minimiert werden.

### Patentansprüche

1. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen, mit:

einem Laserresonator (**11**, **59**, **87**, **75**), durch den wiederholt Lichtenergie entlang einer Laserresonatorachse (**23**) hindurchgeht;

einem Stück einer optischen Multimoden-Faser (**13**), die mit einem Verstärkungsmaterial dotiert ist und die entlang der Laserresonatorachse (**23**) positioniert ist; einer Pumpvorrichtung (**51**, **69**, **71**) zum Anregen des Verstärkungsmaterials;

einer Modenverkopplungsvorrichtung (**35**), die auf der Laserresonatorachse (**23**) positioniert ist; und einem optischen Führungselement (**15**), das auf der Laserresonatorachse (**23**) positioniert ist und das durch die optische Multimoden-Faser (**13**) verstärkte Licht auf vorzugsweise die fundamentale Mode der optischen Multimoden-Faser (**13**) beschränkt.

2. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem die Modenverkopplungsvorrichtung ein passives Modenverkopplungselement umfasst.

3. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 2, bei dem das passive Modenverkopplungselement einen sättigbaren Absorber (**35**) umfasst.

4. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 3, bei dem der sättigbare Absorber (**35**) InGaAsP umfasst.

5. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 3, der zusätzlich eine Leistungsbegrenzungseinrichtung (**39**) umfasst, um den sättigbaren Absorber zu schützen.

6. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 5, bei dem die Leistungsbegrenzungseinrichtung einen Zwei-Photonen-Absorber (**39**) umfasst.

7. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei der das optische Führungselement eine Einmoden-Modenfilterfaser (**15**) auf der Laserresonatorachse (**23**) umfasst.

8. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 7, bei der die Einmo-

den-Modenfilterfaser (15) an ein Ende der optischen Multimoden-Faser (13) Schmelz-verspleißt ist.

9. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 8, bei dem sich die Multimoden-Faser (13) an der Schmelz-Spleißverbindungsstelle konisch verjüngt.

10. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 8, bei dem sich die Einmoden-Modenfilterfaser (15) an der Schmelz-Spleißverbindungsstelle konisch verjüngt.

11. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 8, bei dem sich sowohl die Einmoden-Modenfilterfaser (15) als auch die Multimoden-Faser (13) an der Schmelz-Spleißverbindungsstelle konisch verjüngt.

12. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem die Pumpvorrichtung (51) an die Multimoden-Faser (13) entlang der Laserresonatorachse (23) gekoppelt ist.

13. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem die Pumpvorrichtung (69, 71) an die Seite der Multimoden-Faser (13) gekoppelt ist.

14. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 13, mit zusätzlich einer optischen Kopplungsvorrichtung (61, 63), um die Pumpvorrichtung (69, 71) an die Multimoden-Faser (13) zu koppeln.

15. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 13, mit zusätzlich einer V-förmigen Einkerbung auf der optischen Multimoden-Faser (13), um die Pumpvorrichtung (69, 71) an die Multimoden-Faser (13) zu koppeln.

16. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, mit zusätzlich einem Polarisations-Strahlteiler (29), um die ultrakurzen optischen Impulse von dem Laser auszugeben.

17. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem der Laserresonator ein Paar Reflexionsvorrichtungen (19, 21) an seinen gegenüberliegenden Enden umfasst.

18. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 17, bei dem eine von dem Paar Reflexionsvorrichtungen (19, 21) teilweise reflektierend ist und das Ausgangssignal für den Laserresonator bereitstellt.

19. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 17, bei dem die Modenverkopplungsvorrichtung einen sättigbaren Ab-

sorber (35) umfasst und bei dem eine der Reflexionsvorrichtungen (19) auf einer Oberfläche des sättigbaren Absorbers (35) gebildet ist.

20. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 19, bei dem die Modenverkopplungsvorrichtung zusätzlich eine Leistungsbegrenzungseinrichtung (39) umfasst, um den sättigbaren Absorber (35) zu schützen, und bei der der sättigbare Absorber (35) auf einer Oberfläche der Leistungsbegrenzungseinrichtung (39) gebildet ist, die einer der Reflexionsvorrichtungen (19) gegenüberliegt.

21. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 20, bei dem die Leistungsbegrenzungseinrichtung einen Zwei-Photonen-Absorber (39) umfasst.

22. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, mit zusätzlich einer Kompensationseinrichtung (25, 27) für lineare Phasenabweichungen auf der Laserresonatorachse (23).

23. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 22, bei dem die Kompensationseinrichtung für lineare Phasenabweichungen eine Faraday-Drehvorrichtung (25, 27) umfasst.

24. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 23, bei dem die Kompensationseinrichtung für lineare Phasenabweichungen ein Paar Faraday-Drehvorrichtungen (25, 27) umfasst.

25. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 22, mit zusätzlich einer linearen Polarisations-Umwandlungseinrichtung (31, 33) auf der Laserresonatorachse (23).

26. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 25, bei dem die lineare Polarisations-Umwandlungseinrichtung eine Wellenplatte (31, 33) umfasst.

27. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem die Modenverkopplungsvorrichtung ein aktives Modenverkopplungselement umfasst.

28. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 27, bei dem das aktive Modenverkopplungselement einen optischen Amplitudenmodulator umfasst.

29. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 27, bei dem das aktive Modenverkopplungselement einen optischen Frequenzmodulator umfasst.

30. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem die ultrakurzen optischen Impulse vorzugsweise in der fundamentalen Mode der optischen Multimoden-Faser (13) eine Impulsbreite unterhalb 500 ps haben.

31. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, mit zusätzlich einer Umwelt-Stabilisationsvorrichtung (25, 27) auf der Laserresonatorachse (23), um sicherzustellen, dass der Laserresonator gegenüber Umwelteinflüssen stabil bleibt.

32. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 31, bei dem die Umwelt-Stabilisationsvorrichtung eine Faraday-Drehvorrichtung (25, 27) umfasst.

33. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 32, bei dem die Umwelt-Stabilisationsvorrichtung ein Paar Faraday-Drehvorrichtungen (25, 27) umfasst.

34. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem das optische Führungselement eine optische Faser umfasst, die mit einem Verstärkungsmaterial dotiert ist, um eine Verstärkungs- bzw. Gewinnführung bereitzustellen.

35. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 34, bei dem das Verstärkungsmaterial zentrisch innerhalb eines Teils des Kerndurchmessers der optischen Faser konzentriert ist.

36. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem das optische Führungselement eine optische Einmoden-Faser auf der Laserresonatorachse (23) umfasst.

37. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem das optische Führungselement einen Modenfilter auf der Laserresonatorachse (23) umfasst.

38. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 37, bei dem der Modenfilter die fundamentale Mode der Multimoden-Faser (13) anregt.

39. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 38, bei dem der Modenfilter die fundamentale Mode der Multimoden-Faser (13) mit einem Wirkungsgrad von mindestens 90% anregt.

40. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem der Laserresonator zusätzlich ein Element mit positiver Disper-

sion umfasst.

41. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 40, bei dem das Element mit positiver Dispersion ein Stück einer Einmoden-Faser mit positiver Dispersion umfasst, das entlang der Laserresonatorachse positioniert ist.

42. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 41, mit zusätzlich einer Auskoppelvorrückung zum Begrenzen der Lichtenergie in der Einmoden-Faser mit positiver Dispersion auf weniger als 10% der Spitzenleistung in dem Laserresonator.

43. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 42, mit zusätzlich einer Frequenz-Umwandlungsvorrichtung (79) zum Komprimieren von Impulsen, die von dem Laserresonator erzeugt worden sind.

44. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 43, bei dem die Frequenz-Umwandlungsvorrichtung einen Frequenzverdoppler umfasst.

45. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 44, bei dem der Frequenzverdoppler chirp-moduliertes, periodisch gepoltes  $\text{LiNbO}_3$  (79) umfasst.

46. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem die Multimoden-Faser (13) einen Kern umfasst, und bei dem das Verstärkungsmaterial in der optischen Multimoden-Faser (13) zentrisch innerhalb des Kerns der Multimoden-Faser konzentriert ist.

47. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem die optische Multimoden-Faser (13) polarisationserhaltend ist.

48. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 47, bei dem die polarisationserhaltende Multimoden-Faser (13) einen elliptischen Kern hat.

49. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 47, bei dem die polarisationserhaltende Multimoden-Faser (13) spannungserzeugende Bereiche umfasst.

50. Laser zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 1, bei dem der Laserresonator zusätzlich ein Fasergitter (97) umfasst, das auf die Multimoden-Faser (13) geschrieben ist, wobei das Gitter (97) vorwiegend die fundamentale Mode der Multimoden-Faser (13) reflektiert.

51. Verfahren zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen mit den Schritten:

Umlaufenlassen von Lichtenergie innerhalb eines Laserresonators (**11**, **59**, **75**, **87**);

Modenverkoppeln der Lichtenergie;

Verstärken der Lichtenergie innerhalb des Laserresonators in einer Multimoden-Faser (**13**); und

Beschränken der Lichtenergie innerhalb des Laserresonators (**11**, **59**, **75**, **87**) im wesentlichen auf die fundamentale Mode der Multimoden-Faser (**13**).

52. Verfahren zum Erzeugen von ultrakurzen optischen Impulsen nach Anspruch 51, bei dem der Schritt zum Beschränken den Schritt zum Modenfiltern der Lichtenergie umfasst.

Es folgen 11 Blatt Zeichnungen

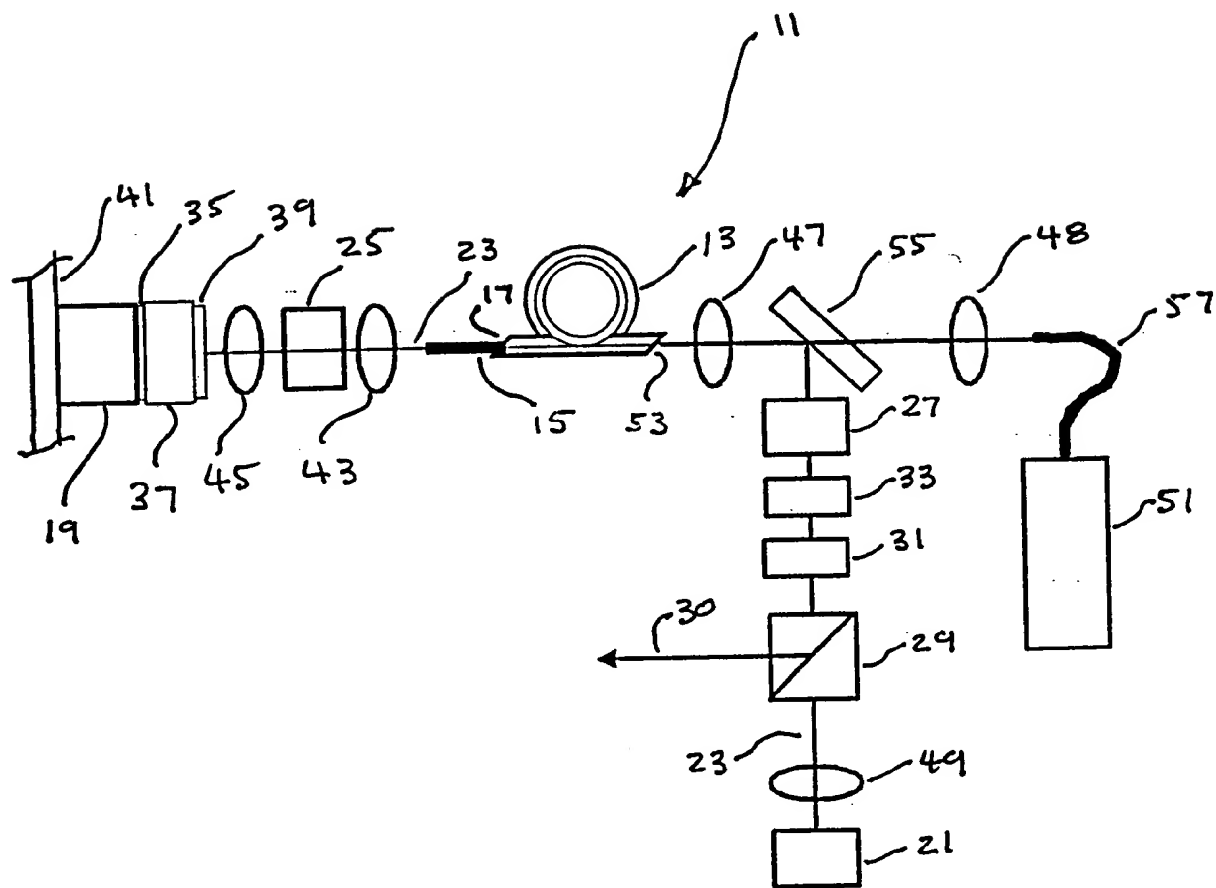


FIG. 1

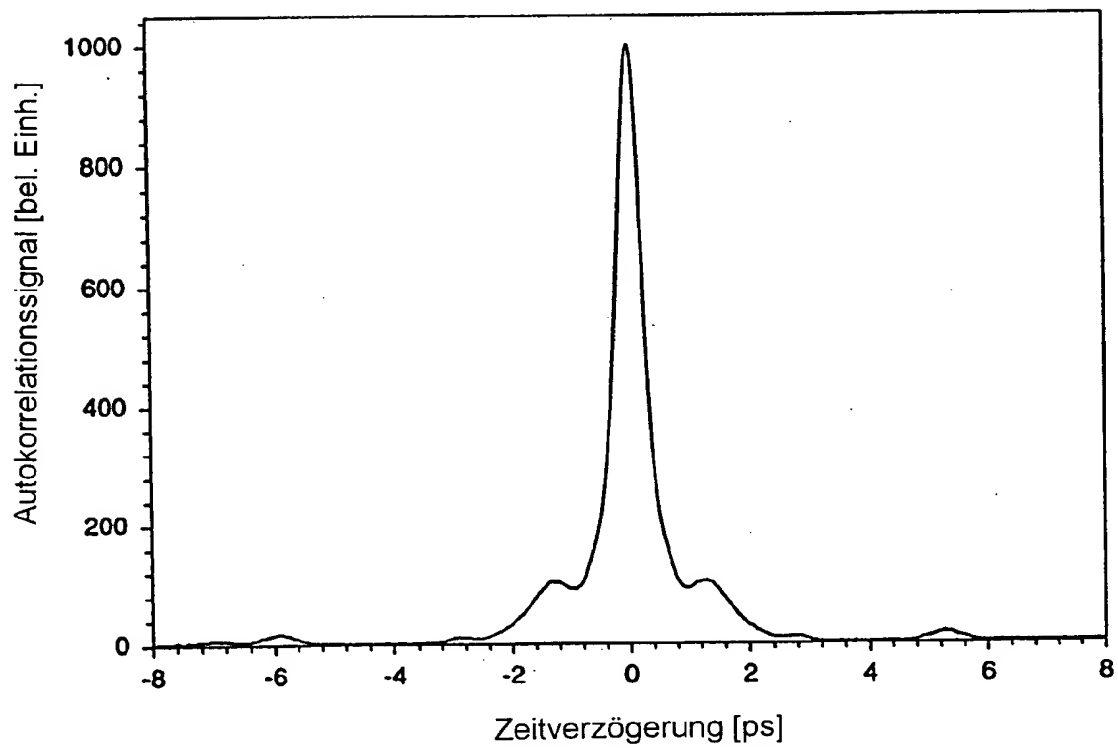


FIG. 2

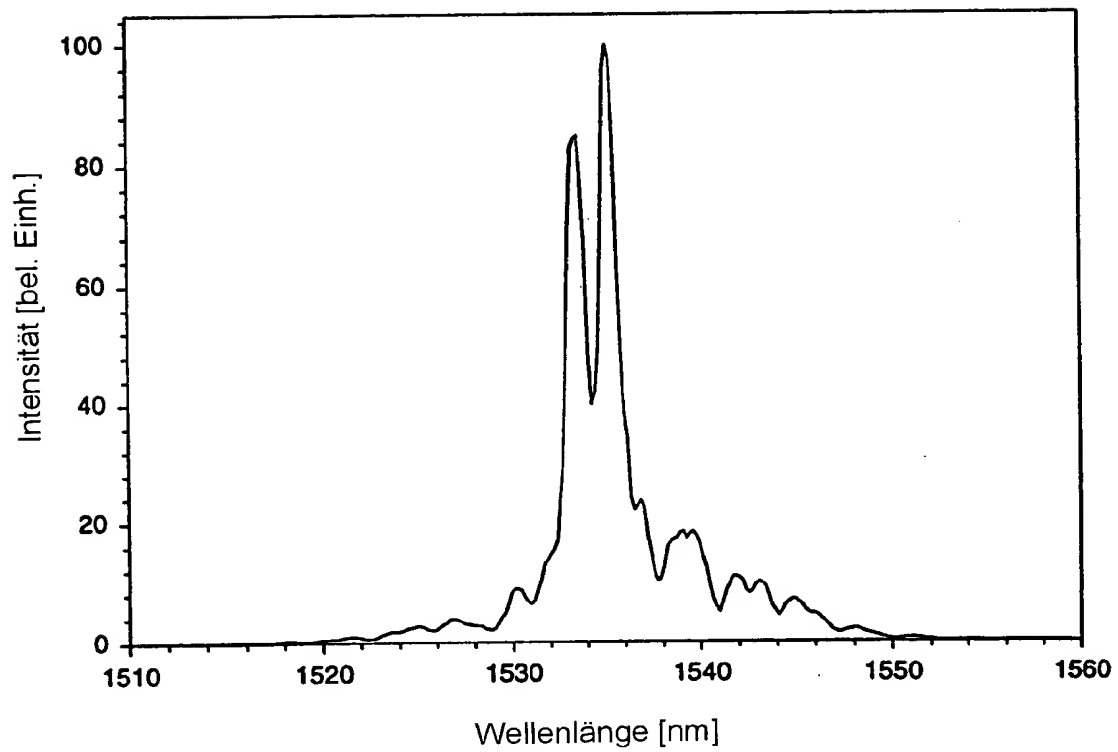


FIG. 3



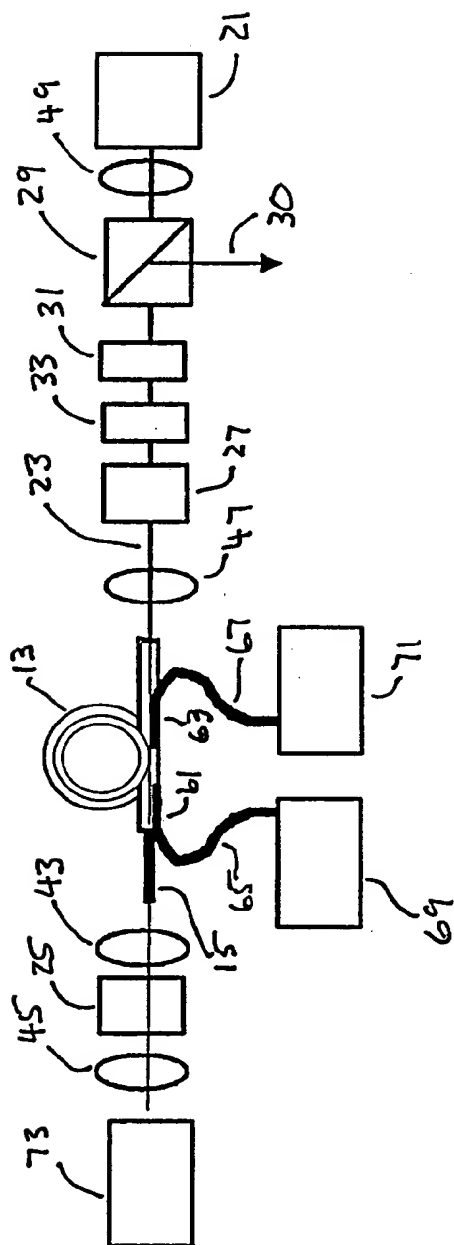


FIG. 4

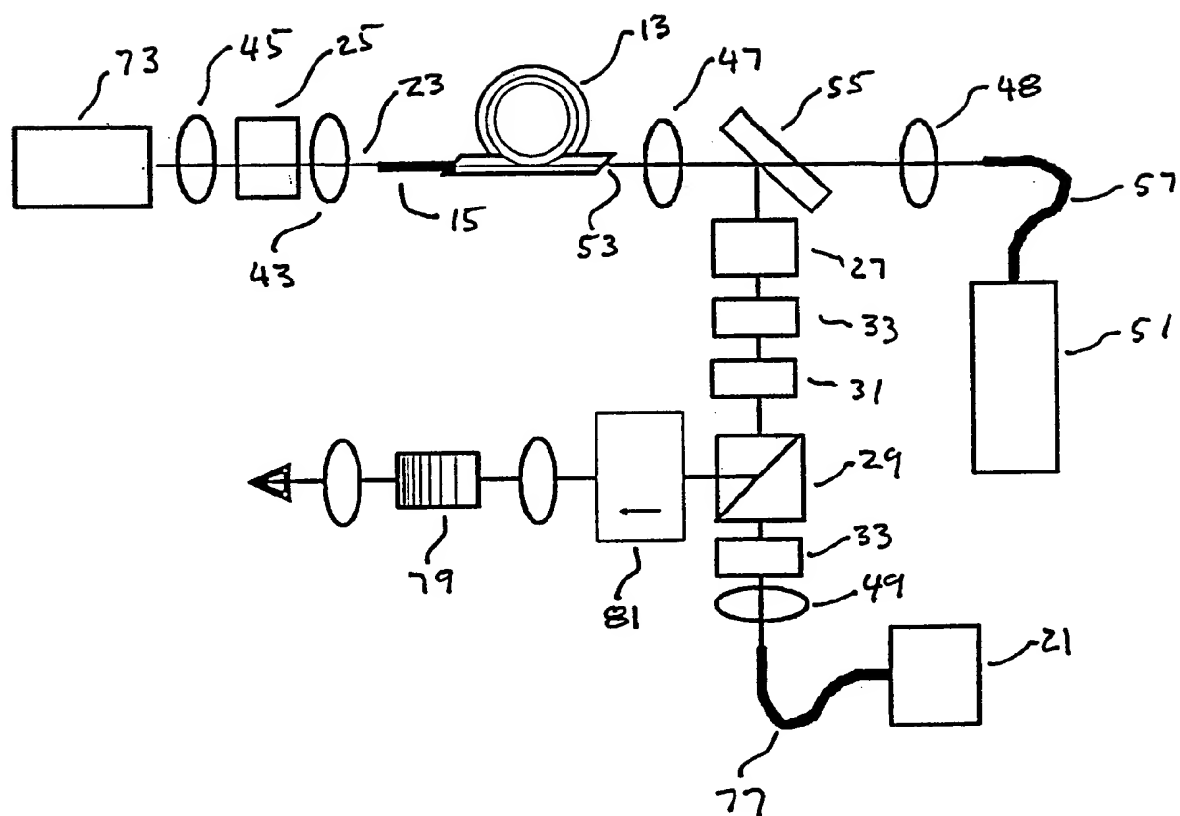


FIG. 5

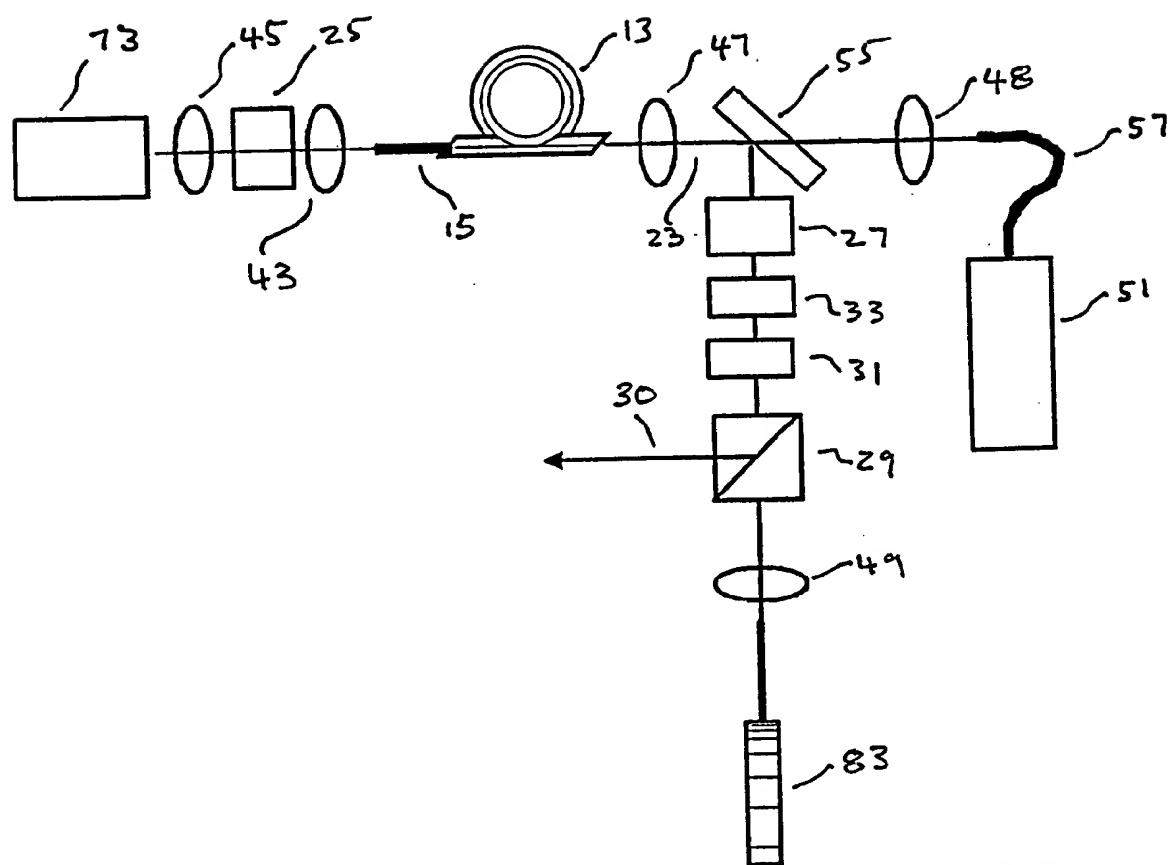


FIG. 6

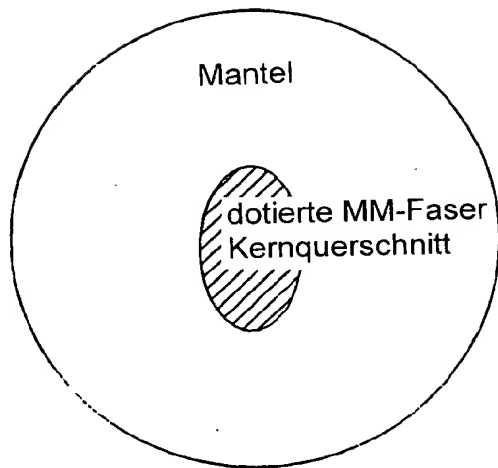


FIG. 7a

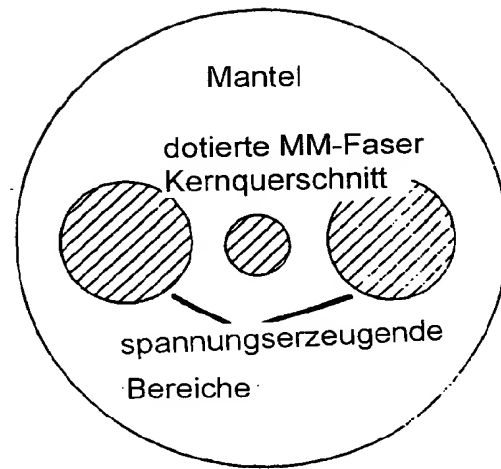


FIG. 7b

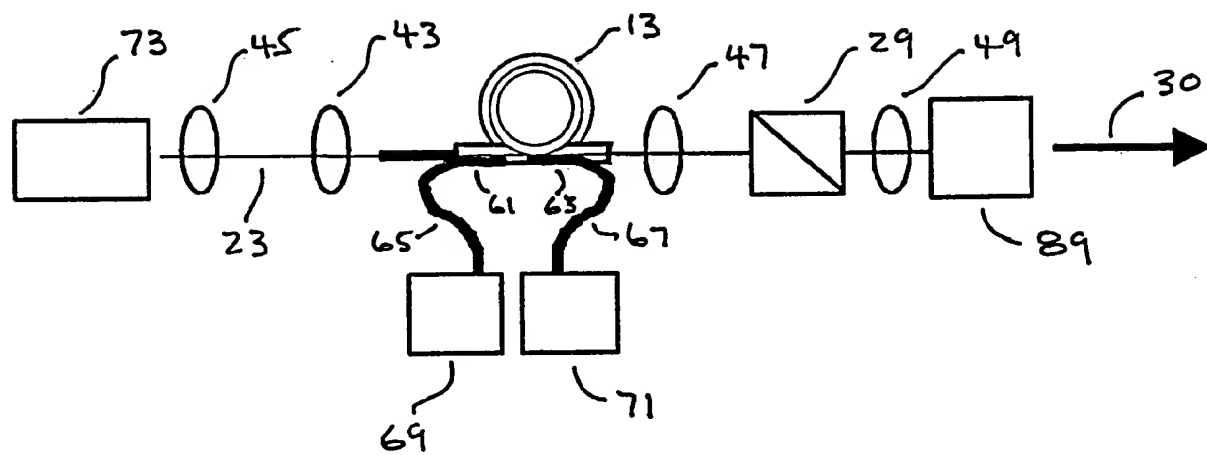
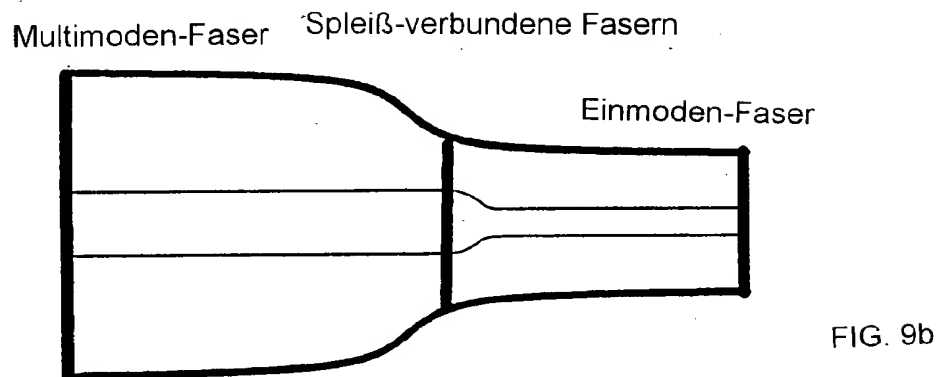
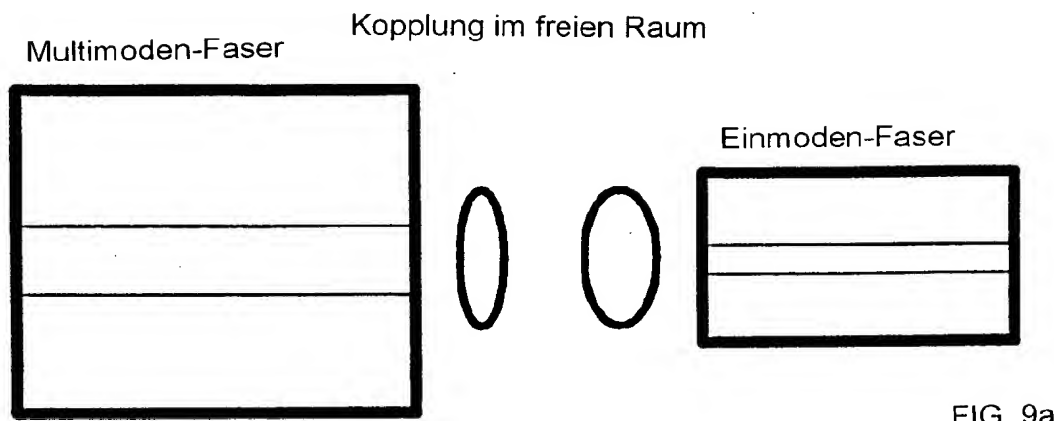
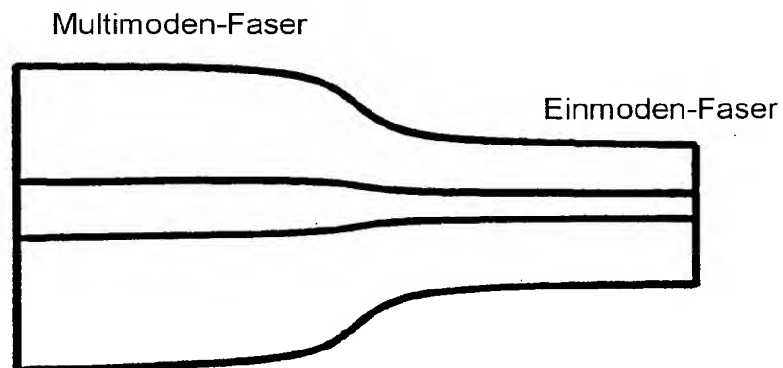


FIG. 8



Konisch zulaufende Verbindung zwischen Multimoden- und Einmoden-Faser



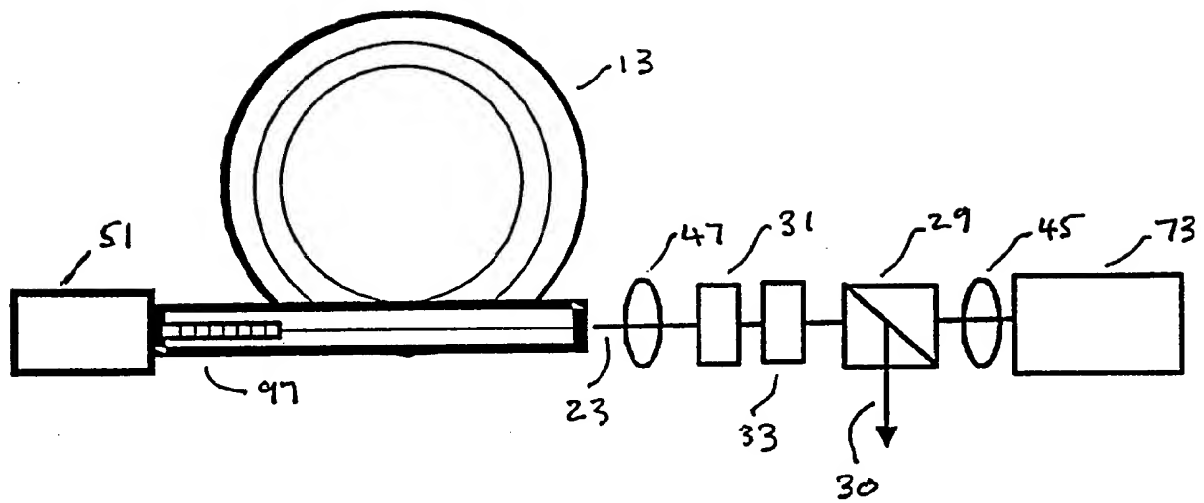


FIG. 10

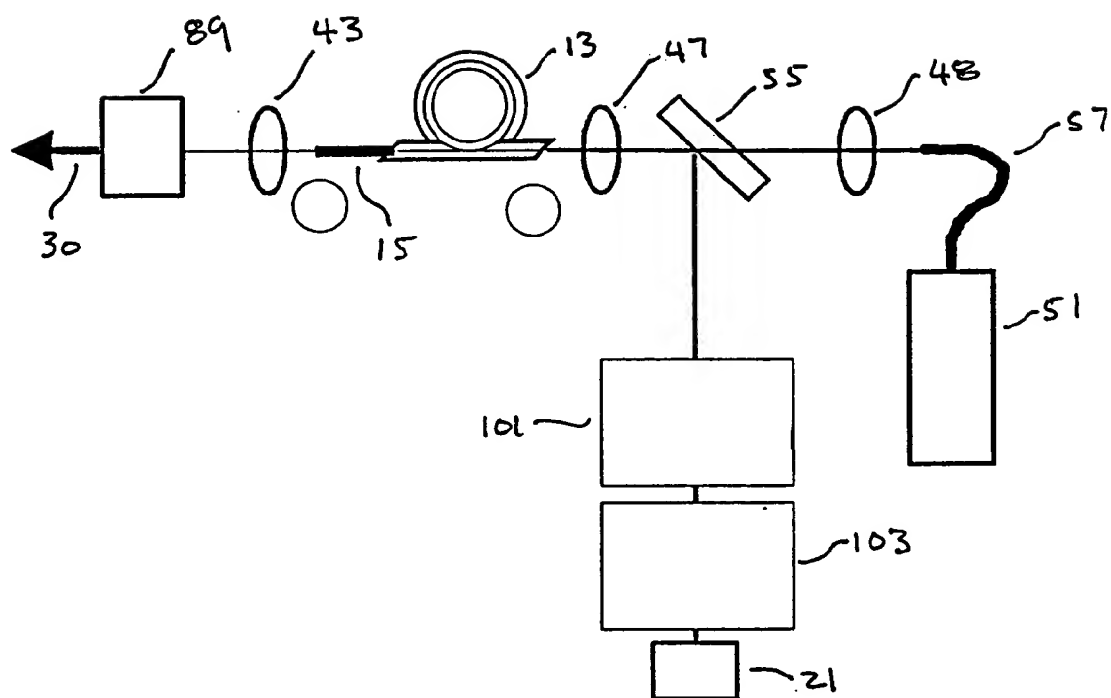


FIG. 11